

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

ANALÝZA NEJISTOT MĚŘENÍ V PLYNÁRENSTVÍ MEASUREMENT UNCERTAINTIES ANALYZE IN GAS INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR TEXTU
AUTHOR

Jan Dominik

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. František Vdoleček CSc.

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2007/08

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Dominik Jan

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza nejistot měření v plynárenství

v anglickém jazyce:

Measurement Uncertainties Analyze in Gas Industry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V dnešní době se do popředí zájmu v oboru měření s vyššími nároky na přesnost, v obchodním styku a pod., dostávají nejistoty měření.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vypracování analýz nejistot typických měření v plynárenských aplikacích, přizpůsobené konkrétním podmínkám dodávek a rozvodu zemního plynu.

Doporučená osnova práce:

1. Měření v plynárenství, používané metody a prostředky
2. Vytipování zdrojů nejistot působících na plynárenská měření
3. Analýza nejistot při měření dodávek plynu
4. Návrh opatření ke snížení nejistot měření

Seznam odborné literatury:

CHUDÝ, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických veličín : 1.vydání
Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.

JENČÍK, J; Volf, J.; Technická měření : 1.vydání Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s.
ISBN 80-01-02138-6.

Časopisy AUTOMA, AUTOMATIZACE

Související normy a předpisy

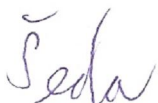
Firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Vdoleček, CSc.

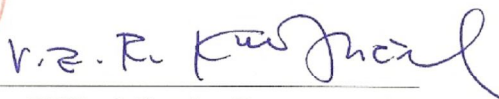
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 11. 12. 2007

L.S.



doc. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

LICENČNÍ SMLOUVA

ABSTRAKT

Bakalářská práce řeší problematiku nejistot v oboru měření průtoku plynu. Zaměřuje se především na vytipování možných zdrojů nejistot s novým prototypem měřidla na energetickou hodnotu plynu, který byl testován přímo na plynovodech na zemní plyn. Výsledky jsou porovnávány na přepočtené hodnoty stávajících objemových měřidel a určena možná nejistota měření pro jednotlivé partnery při distribuci plynu.

ABSTRACT

This bachelor thesis is tackling measurement uncertainty problems with gas metering. It is specially focusing on a new prototype gross heating value indicator, which was tested directly on the pipeline. This measurement results are compare with standard volumetric flow indicator and determined measurement uncertainty for the distribution partners.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nejistota měření, měření průtoku, plyn, spalné teplo,

KEYWORDS

Measurement uncertainty, volumetric flow, gas, gross heating value

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Františku Vdolečkovi CSc. za odpornou pomoc a konzultace, které mi poskytl v průběhu mé práce.

Rád bych také poděkoval svému spolupracovníku Ing. Jiřímu Lipenskému, za konzultace a měření s prototypem HOC_051 a dále všem kolegům ze společnosti RWE Transgas Net s.r.o., kteří mi vytvořili časový prostor pro mou bakalářskou práci.

Obsah:

Zadání závěrečné práce.....	2
Licenční smlouva	5
Abstrakt	7
poděkování.....	9
1 Úvod	13
2 Nejistoty v měření.....	15
2.1 Základní teorie	15
2.2 Základní pojmy	15
2.3 Vyhodnocení vstupní veličiny standardních nejistot metodou A	17
2.4 Vyhodnocení vstupní veličiny standardních nejistot metodou B	18
2.2.3 Kombinovaná standardní nejistota.....	19
3 Hardwarové řešení prototypu HoC_051.....	21
3.1 Elektrické přípoje.....	21
3.2 Plynové přípoje.....	21
3.3 Senzor a senzorový blok	22
3.4 Regulace teploty senzoru	23
3.5 Měření elektrického příkonu	23
3.6 Zpracování dat	23
4 Poznatky ze zkušebního měření	25
4.1 Spuštění měřidla a záznam dat	25
4.2 Doba iniciace – počáteční ustálení systému	25
4.3 Kouřovod.....	26
4.4 Hlídání plamene.....	26
4.5 Porovnání naměřených výsledků s výstupy z GC DANIEL	26
4.7 Pozorované anomálie při měření	28
4.8 Rozsah měření	28
4.9 Kalibrace	29
5 nejistoty měření s prototypem HcO_051.....	31
5.1 Jmenovitá hodnota Q_j	31
5.2 Vyhodnocení standardní nejistoty měření typu A	31
5.3 Vyhodnocení standardní nejistoty měření typu B	32
5.3.1 Vyhodnocení standardní nejistoty měření typu B prototypu HCO_051	32
5.3.2 Vyhodnocení standardní nejistoty měření typu B chromatografu GC Daniel 50032	32
5.3.3 Vyhodnocení ostatních standardní nejistoty měření typu B	32
5.3.4 Celková standardní nejistota typu B	32
5.4 Vyhodnocení kombinované standardní nejistoty.....	33
5.5 Rozšířená nejistota.....	33
6 Závěr	35
7 Tipy a doporučení.....	37
7.1 Měřicí cyklus	37
7.2 Přepínání mezi plyny	37
7.3 „Referenční“ teplota spalování.....	37
7.3 Interval výstupu	37
Seznam použité literatury	38
Přílohy.....	39

1 ÚVOD

Do roku 2001 probíhalo fakturační měření spotřeby plynu na základě naměřeného objemu. Tento postup byl však značně neobjektivní zejména z toho důvodu, že samotný objem nevypovídá nic o obsahu energie v plynu. Podstatně lepší vypovídací hodnotu o energetickém obsahu plynu má „výhřevnost“ resp. „spalné teplo“. Z tohoto důvodu se již v roce 1998 začalo uvažovat o změně účtování distribuovaného zemního plynu, což však vyvolalo potřebu na kontinuální měření výše uvedených energetických veličin. Na základě tohoto požadavku se uzavřela smlouva s UK v Praze na dlouhodobý vývoj měřidla výhřevnosti HoC. Bohužel vývoj probíhal pomaleji než samotná záměna formy účtování.

Od roku 2002 probíhá fakturace zemního plynu formou spalného tepla a jeho měření se provádí pomocí plynových chromatografů, které jsou pro tento účel tzv. „stanovenými měřidly“. Další vývoj měřidla HoC se od roku 2001 ubíral směrem k vytvoření měřidla pro kontrolní sledování hodnoty výhřevnosti topných plynů.

Vzhledem k současnému vývoji plynárenství se ukazuje, že v budoucnu vystane potřeba využít stávající plynárenské sítě k distribuci i jiného média než je zemní plyn. Velmi reálně se již dnes uvažuje o přepravě např. bioplynu. Vzhledem k již započatému vývoji prototypu HoC_051 a jeho variabilním možnostem změny měřeného média bylo rozhodnuto, že následný vývoj je třeba zaměřit tímto směrem.

Po některých úpravách byl sestrojen prototyp č.II, který se konstrukčně vyprofiloval z poznatků, které byly pozorovány při zkušebních laboratorních měření s prototypem č.I. Měření takto nově upraveného zařízení proběhlo v rozmezí roku 2006 a to v reálných podmínkách na plynovodu v lokalitě předávací stanice Hora sv. Kateřiny. Jako měřené médium byl zatím zvolen zemní plyn.

Účelem této práce je analýza chyb, naměřených na prototypu HoC_051 II a v reálných podmínkách na plynovodu.

2 NEJISTOTY V MĚŘENÍ

2.1 Základní teorie

Přesnost měření se po dobu přibližně sta let vyjadřuje pomocí tzv. chyby měření a definuje se jako rozdíl hodnoty pravé a naměřené. Absolutní chybou nazýváme měřené veličiny (např. v ampérech, voltech, stupních celsia) a vyjadřujeme je v jednotkách. Relativní chybu definujeme jako podíl absolutní chyby a naměřené hodnoty, takže je bezrozměrná a často se vyjadřuje v procentech. Podrobněji chyby dělíme na systematické a náhodné (stochastické). Náhodné chyby se projevují rozdílnými výsledky opakovaných měření stejné veličiny za stejných podmínek.

Pojem nejistota měření byl zaveden na základě doporučení 70. a 75. zasedání Mezinárodního výboru pro míry a váhy (CIPM - Comité International des Poids et Mesures), která se konala v letech 1981 a 1985. V r.1993 vydala Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) první vydání praktické příručky pro určování nejistot měření (Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements, [1]) Tam jsou definovány základní pojmy teorie nejistot měření, uvedeny základní vztahy a na vybraných příkladech ukázána aplikace těchto vztahů [3].

Nejběžnější způsob vyjádření nejistoty je v jednotkách měřené veličiny (čili jako "absolutní"). Druhou formou, kterou lze nejistotu měření vyjádřit, je forma relativní, (čili poměr absolutní nejistoty k absolutní hodnotě naměřené veličiny). Pojem chyba měření se nadále používá v korekcích systematických (čili "soustavných") chyb. Tyto chyby měření zůstávají stejné při opakovaných měřeních. V některých případech (když je znám mechanismus jejího vzniku) je možné ji odstranit matematickou úpravou výsledku měření, tzv. korekcí. Příkladem chyby systematické je tzv. chyba metody, která je způsobená například při měření napětí odporem voltmetru, který je použit pro měření.

2.2 Základní pojmy

Nejistota měření je přidružený parametr charakterizující rozptýlení hodnot od výsledku měření. Odůvodněně lze pokládat za hodnotu veličiny, která je objektem měření

Tímto parametrem může být směrodatná (čili "standardní") odchylka nebo její daný násobek. Nejistota měření je obecně složena z několika složek, které mohou být vyhodnoceny ze statistického rozložení výsledků daných měření a mohou tak charakterizovat experimentální standardní odchylku (čili experimentálně určeným odhadem této standardní odchylky). Jiné složky (které mohou být ale také charakterizovány standardní odchylkou) se vyhodnocují z předpokládaného pravděpodobnostního rozložení. Typy rozložení jsou určovány na základě zkušeností, či jiných informací. Složky korekcí a referenčních etalonů nejistoty přispívají k rozptýlení výsledků měření.

Analogické definice mají nejistoty údajů měřicích přístrojů, nejistoty konstant a nejistoty korekcí. Základní kvantitativní charakteristikou nejistoty měření je **standardní nejistota**. Je to standardní (směrodatná) odchylka veličiny, pro níž je nejistota udávána. Označuje se symbolem u (z anglického výrazu *uncertainty*, česky nejistota).[3]

Standardní nejistoty se podle způsobu svého vyhodnocení dělí na:

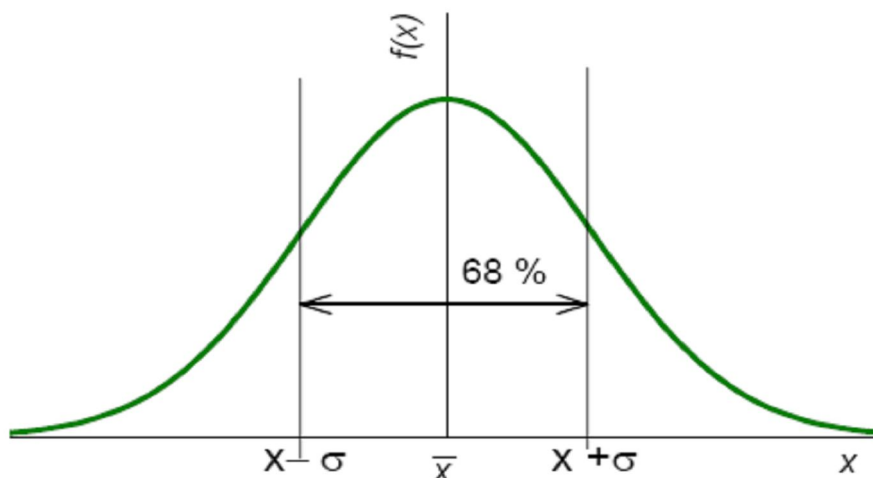
- **standardní nejistoty typu A** (označení u_A) se stanovují z výsledků opakovaných měření, a to statistickou analýzou série naměřených hodnot. Jejich hodnota klesá s počtem měření a příčiny těchto nejistot se považují za neznámé.
- **standardní nejistoty typu B** (označení u_B) se vyhodnocují pro jednotlivé zdroje nejistoty identifikované pro konkrétní měření a jejich hodnoty nezávisí na počtu opakování měření. Společné působení pocházející od různých zdrojů vyjadřuje výsledná standardní nejistota typu B.
- **standardní nejistota kombinovaná** (označení u_C) vznikne sloučením standardní nejistoty typu A s výslednou standardní nejistotou typu B. Používá se, je-li výsledek měření získán z hodnot několika veličin, a je rovna odmocnině součtu rozptýlů (variancí, disperzí) a kovariancí těchto veličin. Tyto variance a kovariance jsou násobeny

- váhovými koeficienty, jejichž hodnoty vyjadřují, jak se výsledek měření mění se změnami těchto jednotlivých veličin.

Pro standardní nejistotu typu A rovnou u_A a výslednou standardní nejistotu typu B rovnou u_B je pak kombinovaná standardní nejistota u_C rovna:

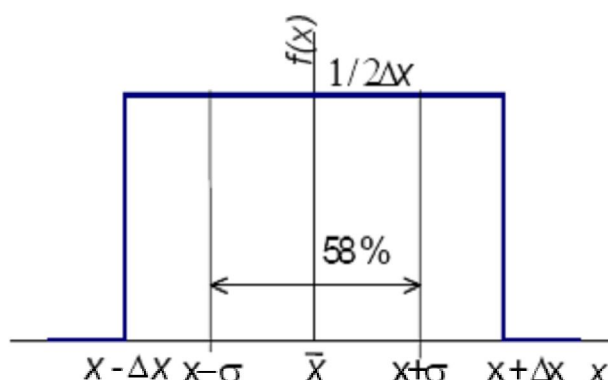
$$u_C(X) = \sqrt{u_A^2(X) + u_B^2(X)} \quad (1)$$

Směrodatná odchylka (a tedy i standardní nejistota) veličiny x představuje u veličiny rozdělené podle normálního rozdělení pravděpodobností polovinu šířky intervalu, v jehož středu leží střední hodnota veličiny x a ve kterém s pravděpodobností přibližně 68 % leží každá hodnota veličiny x . Tuto situaci znázorňuje obr. 1[3].



Obr. č.: 1 Hustota pravděpodobnosti normálního (Gaussova) rozložení pravděpodobnosti.

Rozkládá –li se veličina x podle rovnoměrného rozdělení pravděpodobností a nepřekročí-li interval o šířce $2\Delta X$, všechny hodnoty této veličiny budou ležet v intervalu $\pm \Delta X$ okolo střední hodnoty. Tento případ je standardní odchylkou této veličiny (složkou standardní nejistoty typu B) a je rovna $\frac{\Delta X}{\sqrt{3}}$, plyne pak z vlastností rovnoměrného rozdělení pravděpodobností. Graf rovnoměrného rozdělení pravděpodobností uvádí obr. 2



Obr.č.:2 Hustota pravděpodobnosti rovnoměrného rozložení pravděpodobnosti

2.3 Vyhodnocení vstupní veličiny standardních nejistot metodou A

Metoda vyhodnocení (nejistoty typu A) vychází ze statistické analýzy opakované série měření. Máme-li n stejně nezávislých přesných pozorování ($n > 1$), odhad výsledné hodnoty měřené veličiny x stejně reprezentován hodnotou aritmetického průměru výsledků těchto opakovaných měření. K odhadu x se příslušná nejistota určí jako směrodatná odchylka této hodnoty. Jedná se tedy o výběrový průměr a můžeme napsat:

$$u_A(X) = \tilde{\sigma}(\bar{X}) = \frac{\tilde{\sigma}(\bar{X})}{\sqrt{n}} = \left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Kde

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

a kde $\tilde{\sigma}(\bar{X})$ je odhad směrodatné odchylky aritmetického průměru \bar{X} , n je počet prvků počet opakovaných měření (čili výběrového souboru).

Tato nejistota je tvořena kolísáním naměřených údajů. Uvedený vztah je malým počtem měření ($n < 10$) velmi nespolehliví. Chceme-li tedy vyhodnocovat nejistotu měření metodou A, musíme opakovat měření pokud možno vícekrát.

2.4 Vyhodnocení vstupní veličiny standardních nejistot metodou B

Standardní nejistota typu B se odhaduje pomocí úsudku na základě dostupných informací a zkušenosti. Nejčastěji se použijí:

- údaje výrobce měřicí techniky (technické parametry použitého zařízení, např. třída přesnosti elektromechanického (ručkového) měřicího přístroje, nebo dvojice konstant charakterizujících chybu číslcového měřicího přístroje, například teploměru)
- nejistoty referenčních údajů v příručkách
- zkušenosti z předchozích měření
- zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů a techniky a poznatky o nich
- údaje získané při kalibraci a z certifikátů

Postup vyhodnocení výsledné nejistoty typu B se skládá:

- Vybráním dílčích možných zdrojů nejistot typu Z_1, Z_2, \dots, Z_m . V praxi jsou tyto zdroje totožné s nezanedbatelnými ovlivňujícími veličinami daného měření. (například teplotou okolí při měření jiné veličiny, než je teplota.)
- Pro každý z těchto zdrojů Z_j je určen interval $\langle -\Delta Z_{j\max}, +\Delta Z_{j\max} \rangle$, jehož meze nebudou překročeny odchylkou ΔZ_j veličiny Z_j od jmenovité hodnoty této veličiny.
- Standardní (směrodatnou) odchylku σ_j určíme pro každé ΔZ_j , a to na základě předpokládaného rozložení pravděpodobnosti veličiny ΔZ_j v intervalu $\langle -\Delta Z_{j\max}, +\Delta Z_{j\max} \rangle$. Nemáme-li žádné doplňující informace o této veličině, můžeme předpokládat, že je v intervalu $\langle -\Delta Z_{j\max}, +\Delta Z_{j\max} \rangle$ rozdělena rovnoměrně, a to nulou vně tohoto intervalu o šířce $2\Delta Z_{j\max}$ a dostáváme tedy:

$$\sigma_j = \frac{\Delta Z_{j\max}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Tato standardní odchylka je složkou standardní nejistoty typu B způsobenou zdrojem Z_j .

$$U_{Z_j} = \sigma_j \quad (5)$$

Známe-li přímo hodnotu standardní nejistoty u_{Z_j} (například z certifikátů od výrobce daného měřidla), můžeme tento údaj použít jako další složku pro určení standardní nejistoty typu B.

- Odhadnuté nejistoty u_{Z_j} se přenášejí do nejistoty výsledku měření veličiny X a tvoří její složky

$$u_{X,Z_j} = A_{X,Z_j} u_{Z_j} \quad (6)$$

kde A_{X,Z_j} jsou tzv. citlivostní koeficienty.

V případě, že je známa závislost $x = f(z_1, \dots, z_m)$, jsou jednotlivé citlivostní koeficienty definovány parciálními derivacemi čili vztahem:

$$A_{X,Z_j} = \frac{\sigma f(Z_1, Z_2, \dots, Z_m)}{\sigma_{Z_j}}, \quad j = 1, \dots, m \quad (7)$$

Za předpokladu nekorelovanosti jednotlivých zdrojů nejistoty typu B (praxi nejčastěji předpokládané), pro výslednou standardní nejistotu typu B platí:

$$u_B(X) = \left[\sum_{j=1}^m A_{X,Z_j}^2 u_{X,Z_j}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

2.2.3 Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovaná standardní nejistota se vypočte podle vztahu:

$$u_X = \sqrt{u_{AX}^2 + u_{BX}^2} \quad (9)$$

3 HARDWAROVÉ ŘEŠENÍ PROTOTYPU HOC_051

Konstrukce prototypu je orientována i na převoditelnost jednotlivých detailů do pozdější průmyslové verze řešení. Z toho důvodu bylo zvoleno umístění všech komponent do průmyslového 19“ rámu, který automaticky nabízí průmyslovou ochranu před prachem a stříkající i slanou vodou.

Základní rám je horizontálně a vertikálně rozdělen a dovolil tak umístění elektronických a mechanicko pneumatických komponent vedle sebe.

Všechna připojení kabelů a plynových trubek jsou vyvedena na zadní stěnu rámu a dovolují tak snadné a bezpečné připojení na vnější elektrické a plynové zdroje.

3.1 Elektrické přípoje

Vnější elektrické připojení 220V je pouze jako transformační vstup, všechny vnitřní obvody jsou nízkonapěťové. Toto řešení dovoluje pro následné průmyslové řešení vyloučit vysokonapěťové připojení a nahradit je nízkonapěťovým zdrojem. Nepřímo je takto řešena podmínka průmyslové ochrany „Ex-proof“.

Datová sběrnice sériového zapojení RS232, ve standardním provedení CANNON 9, je rovněž umístěna na zadní stěně 19“ rámu.

3.2 Plynové přípoje

Vnější plynová připojení jsou standardní metrická šroubení měřicí techniky pro ocelové kapiláry s vnějším průměrem O.D. 1/8“. Tato pevná, šroubovaná spojení, se systémem dvou škrťících kroužků, těsnící až do tlaku 20 MPa, standardní spojení používaná v naftovém a plynárenském průmyslu, jsou zde použita pro připojení po předchozí redukci na požadovaný přetlak 200 kPa před regulátory objemového průtoku.

Regulátory průtoku, spolu s přívodními ocelovými kapilárami, jsou umístěny v termostatovaném bloku. Tímto řešením objemové regulace průtoku je vyloučena změna hmotnostního průtoku, vyplývající z kompresibility plynů j podle následující rovnice (10), kde P_i je vstupní tlak a P_0 je výstupní (atmosférický) tlak. Platí:

$$j = \frac{P_0}{\bar{P}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\left(\frac{P_i}{P_0}\right)^2 - 1}{\left(\frac{P_i}{P_0}\right)^3 - 1} \quad (10)$$

Dále je vyloučena fluktuace objemového průtoku plynu na teplotě, vyplývající z teplotní závislosti viskozity η , viz následující rovnice (11) a (12), kde r je vnitřní průměr ocelové kapiláry a L je její délka. Platí

$$\eta = f(T^{0,7}) \quad (11)$$

$$F_C = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot L \cdot \eta} \cdot \frac{P_i^2 - P_0^2}{P_0} \quad (12)$$

Za výše uvedených podmínek bylo dosaženo přesnosti regulace průtoku plynu lepší než $\pm 0,1\%$. Výše uvedené podmínky regulace průtoku platí jak pro kalibrační větev, tak pro měřený plyn.

Oba přípoje plynu jsou vyvedeny paralelně na zadní stěnu rámu a jsou ukončeny dvěma magnetickými dvoucestnými ventily ON-OFF, které jsou uzavřené v bezproudové posici (NC – normally closed). Za těchto podmínek jsou v bezproudovém stavu vedení uzavřena a nedochází k úniku plynu z vedení. Pro trojcestný ventil nebylo možné uzavřít oba přívody plynu pro bezproudový stav.

Poloha a ovládání magnetických ventilů je řízeno softwarovým programem.

3.3 Senzor a senzorový blok

Senzor je klíčovým bodem měřidla spalného tepla zemního plynu. Z pseudo- kalorimetrického principu vyplývá, že je-li teplota senzoru T_{sens} určena teplem ze dvou zdrojů, kde Q_{el} je teplo elektrického vytápění a Q_{ng} je teplo spalovaného zemního plynu

$$T_{SENS} = f(Q_{el} + Q_{ng}) \quad (13)$$

udržována konstantní

$$T_{SENS} = konst$$

potom jakákoli změna v teple zemního plynu ΔQ_{ng} bude kompenzována teplem elektrického ohřevu ΔQ_{el} . Platí:

$$|\Delta Q_{ng}| = |\Delta Q_{el}| \quad (14)$$

Z výše uvedeného popisu principu měření vyplývá důležitost citlivosti a přesnosti regulační zpětné vazby teplota senzoru T_{sens} a elektrický příkon elektrického ohřevu senzoru Q_{el} pro správnou funkci měřidla.

Senzor byl konstruován z hliníkové slitiny o hmotnosti tělíska 7g. Teplota senzorového tělesa byla zvolena 220°C. K zážehu plynu byl použit piezoelektrický element. Toto řešení by mělo umožňovat budoucí automatický zážeh plynů při případném zhasnutí plamene.

Vývod kondensátu je na zadní stěně 19“ rámu. Senzor i s termostatovaným pláštěm je umístěn v uzavřeném bloku o objemu 1 dm³. Toto modulární řešení by mělo umožnit jak nezávislou konstrukci a optimalizaci senzorové části měřidla, tak jeho snadnou servisní obslužnost.

3.4 Regulace teploty senzoru

Pro regulaci teploty senzoru bylo použito nové pulzní uspořádání s konstantní amplitudou. Frekvence pulsu je 0,001 sekundy a regulace je dosaženo aditivním řazením pulsů. Toto uspořádání je nové a je předmětem řízení patentové ochrany firmy Labio,a.s.

3.5 Měření elektrického příkonu

Měření elektrického příkonu je v daném uspořádání pulzní regulace teploty senzoru zredukováno na načítání počtu pulsů. Předností uvedeného uspořádání měření elektrického příkonu senzoru je dosažení přesnosti měření lepší než jedno promile $\pm(0,1\%)$.

3.6 Zpracování dat

V rámci konstrukce vyvíjeného prototypu laboratorního měřidla spalného tepla zemního plynu, bylo požadováno dosáhnout samostatného a kontrolovaného provozu měřidla a sdílet měřené hodnoty spalného tepla s externí stand-alone displayovou, kontrolní, či řídicí jednotkou.

Pro tyto účely bylo měřidlo osazeno všemi potřebnými senzory.

Vstupní analogové signály jsou digitalizovány a zpracovávány na interním interface prototypu. Program na vlastní procesorové jednotce řídí časovou následnost, provádí výpočet spalného tepla zemního plynu a provádí jeho aktualizaci na seriovém výstupu.

Uvedený způsob řešení prototypu, umožňuje jeho připojení k externímu počítači a úpravu výstupu podle potřeb. Avšak změna časových následností, či datového reportu je podmíněna přeprogramováním procesorové jednotky. Lze říci, že toto řešení je univerzální a dovoluje spojení s jakýmkoli jinými přístroji.

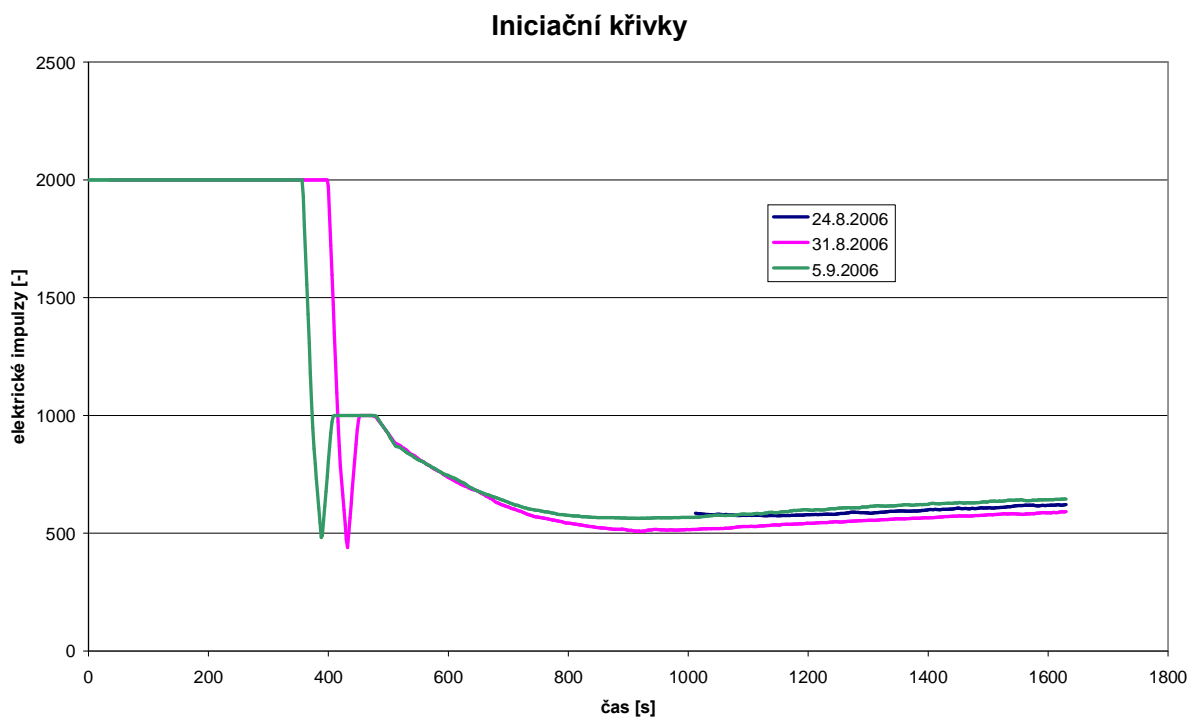
4 POZNATKY ZE ZKUŠEBNÍHO MĚŘENÍ

4.1 Spuštění měřidla a záznam dat

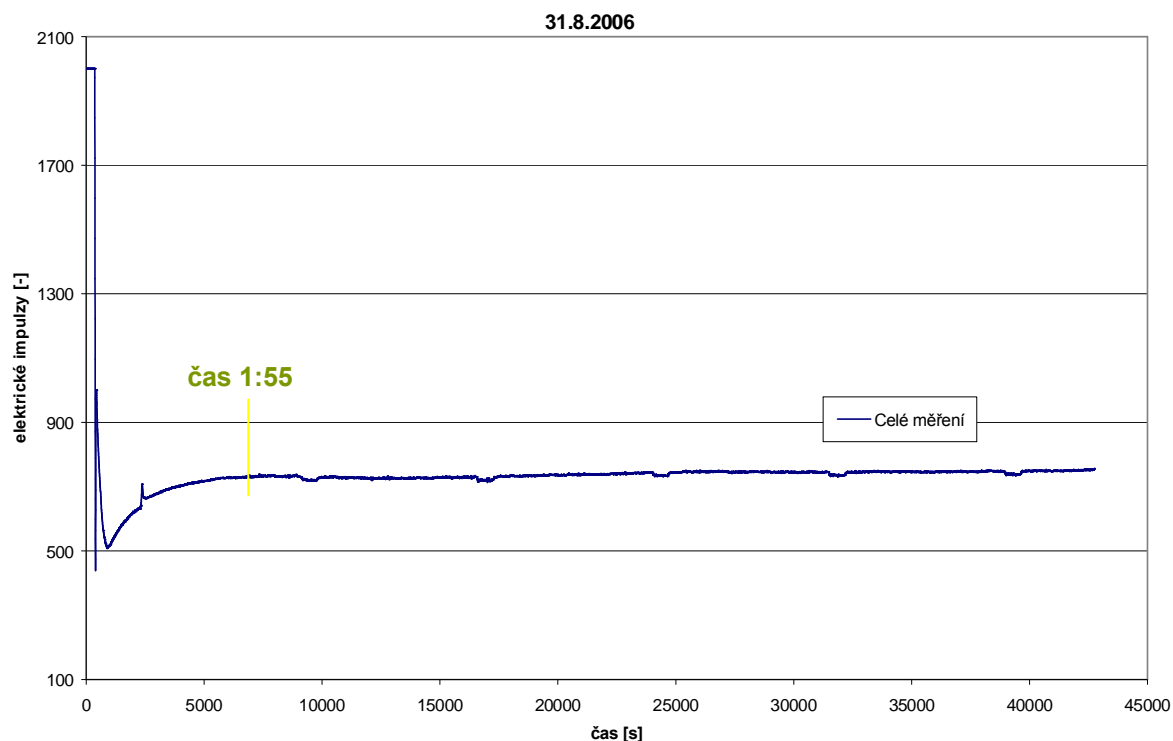
Po spuštění měřidla a vpuštění plyných médií, (spalovací vzduch, kalibrační plyn a měřený plyn) bylo nejprve nutné vyčkat na naplnění potrubí a ustálení průtoků. Teprve poté bylo možné provést zapálení plamínku. Tato doba byla poměrně krátká a obvykle stačilo i méně než 2 minuty. Samotné měření probíhalo automaticky, kontinuálně a naměřená data byla zaznamenávána počítačem pomocí Hyper Terminálu každé 2 sekundy.

4.2 Doba iniciace – počáteční ustálení systému

Bylo pozorováno, že relevantní výsledky měření začínají být až cca po 2 hodinách provozu spuštěného zařízení. Do této doby probíhá ustalování systému za vytváření jakési "iniciační vlny" viz graf č. 1, která ovšem dalece přesahuje softwarově nastavený čas pro iniciaci. Vzájemný posun křivek ve směru osy x je pravděpodobně způsoben pouze různým časem zapnutí Hyper Terminálu. Nastavená doba na ustálení systému (cca 30 minut) je dle měření nedostatečná viz graf č. 2. (Doporučení: prodloužení tohoto intervalu až na 2 hodiny.)



Graf č.: 1 Průběh „iniciační vlny“



Graf č.: 2 Ustabilování systému a průběh celého měření

4.3 Kouřovod

Vodorovný komín, ukrytý pod horním krytem měřidla a sloužící k odvodu spalin na zadní stranu, není pro přístroj vůbec vhodný. S tímto nasazeným tubusem měřidlo nefungovalo a cca po 10-15 minutách docházelo ke zhasínání plamínku. Důvodem bylo pravděpodobně hromadění spalin v prostoru hoření. Při provozu bez tubusu ke zhasnutí plamínku nikdy nedošlo!

4.4 Hlídání plamene

Nutností je přístroj vybavit automatickým hlídáním plamene, aby bylo možné provádět dlouhodobá měření bez přítomnosti obsluhy či dozoru.

4.5 Porovnání naměřených výsledků s výstupy z GC DANIEL

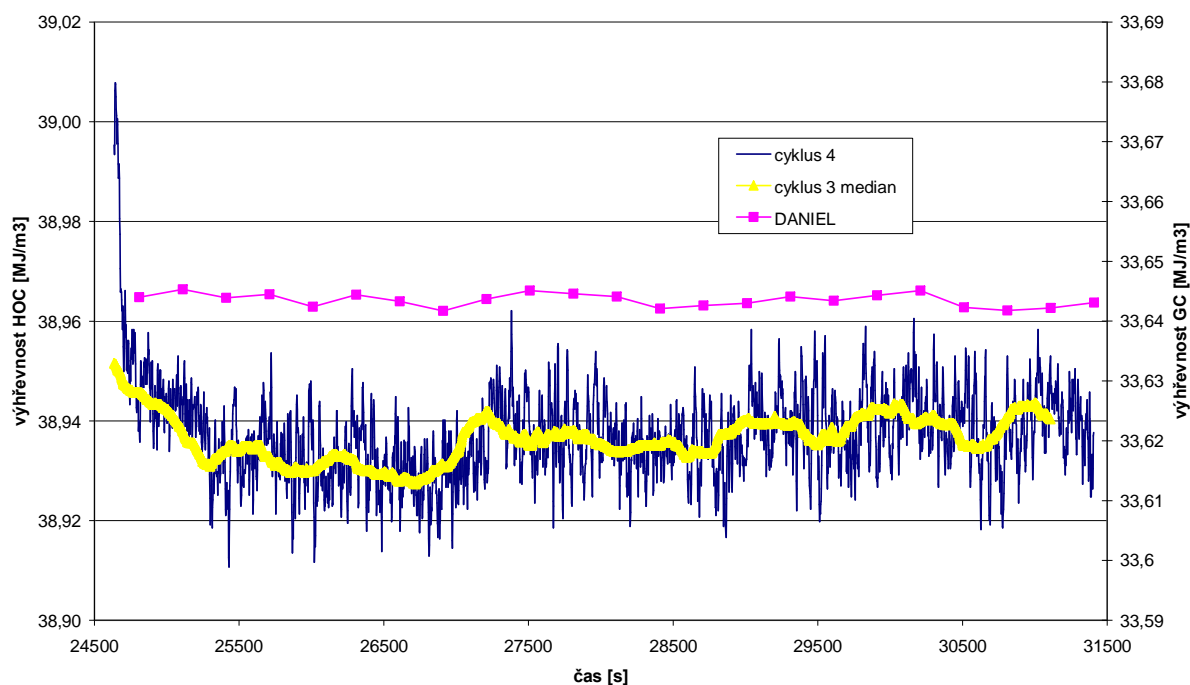
Hlavním cílem zkušebního měření na HPS-HSK, bylo ověřit přesnost měření a reprodukovatelnost dat udávaných vyvíjeným měřidlem HOC.

Při samotném měření, byl tedy kladen důraz zejména na stabilitu měřených dat a na průměrnou odchylku získaných hodnot. Vzhledem k velice stálé a prakticky neměnné výhřevnosti měřeného plynu, byly veškeré výpočty vztahovány k jednotlivým měřicím cyklům (110 min) a výsledky jsou uvedeny v tabulce 1 spolu s daty z GC, které byly průměrovány vždy za celou dobu měření.

Tabulka č.: 1 Průměrné odchylky měření v porovnání s plynovým chromatografem

MĚŘENÍ		Průměrná hodnota [MJ/m ³]	průměrná odchylka [MJ/m ³]	% odchylka	Průměrná hodnota Mediánů	průměrná odchylka od hodnot mediánů [MJ/m ³]	% odchylka od hodnot mediánů
24.8.2006	1. cyklus	38,4984	0,0691	0,18%	38,5120	0,0557	0,14%
	2. cyklus	38,9231	0,0091	0,02%	38,9222	0,0068	0,02%
	GC DANIEL	33,7383	0,0054	0,016%			
31.8.2006	1. cyklus	38,5797	0,0882	0,23%	38,5764	0,0837	0,217%
	2. cyklus	38,9553	0,0082	0,02%	38,9554	0,0056	0,014%
	3. cyklus	38,9097	0,0082	0,04%	38,9091	0,0138	0,036%
	4. cyklus	38,9374	0,0069	0,02%	38,9366	0,0037	0,009%
	5. cyklus	38,9457	0,0068	0,02%	38,9451	0,0033	0,008%
	6. cyklus	38,9385	0,0067	0,02%	38,9378	0,0042	0,011%
	GC DANIEL	33,6447	0,0025	0,007%			
5.9.2006	2. cyklus	40,1427	0,0721	0,18%	40,1545	0,0551	0,14%
	3. cyklus	39,0262	0,0165	0,04%	39,0270	0,0150	0,04%
	4. cyklus	39,0381	0,0123	0,03%	39,0379	0,0108	0,03%
	5. cyklus	39,0435	0,0080	0,02%	39,0438	0,0050	0,013%
	6. cyklus	39,0546	0,0068	0,02%	39,0552	0,0028	0,007%
	GC DANIEL	33,6444	0,0013	0,004%			

31.8. 2006 4. cyklus



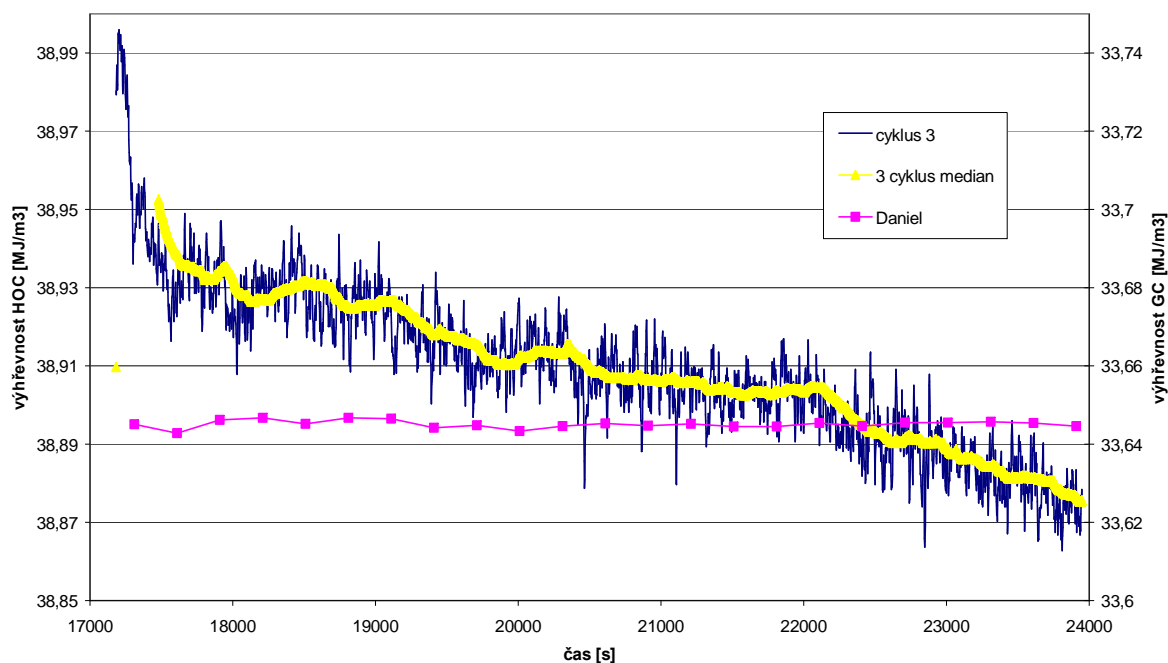
Graf č.: 3 Porovnání průběhu měření výhřevnosti měřidlem HOC a plynovým chromatografem DANIEL

Další grafické porovnání naměřených výsledků s obchodním měřením GC DANIEL jsou uvedeny v příloze č. 1. V příloze jsou uváděny výsledky ze všech měření, i když data naměřená před 5.9. 2006 není prakticky možné porovnávat z důvodu záměny vstupních médií. V příloze jsou dále pro informaci graficky znázorněny všechny měřicí cykly tak, jak šly chronologicky za sebou, včetně křivek 5 minutových mediánů a přehledů celých měření.

4.7 Pozorované anomálie při měření

Jak je vidět na grafu č. 4 při měření 31.8. 2006 se vyskytly jakési nepravidelnosti. V průběhu 3. cyklu docházelo k pozvolnému klesání měřené výhřevnosti, resp. ke zvyšování počtu elektrických impulsů, aniž by se výhřevnost plynu jakkoli měnila. Podobná věc byla pozorována i v průběhu měření dne 5.9. 2006 ve 3. a 4. cyklu viz grafy v příloze č. 1. Poté docházelo k opětovnému ustálení měření. Tento jev si zatím nedokážeme vysvětlit a ani nelze určit, zda se při dlouhodobém měření bude opakovat. Pro odpověď na tyto nejasnosti bude nutné provést dlouhodobější měření.

31.8.2006 3. cyklus



Graf č. 4 Pokles výhřevnosti během 3 cyklu měření

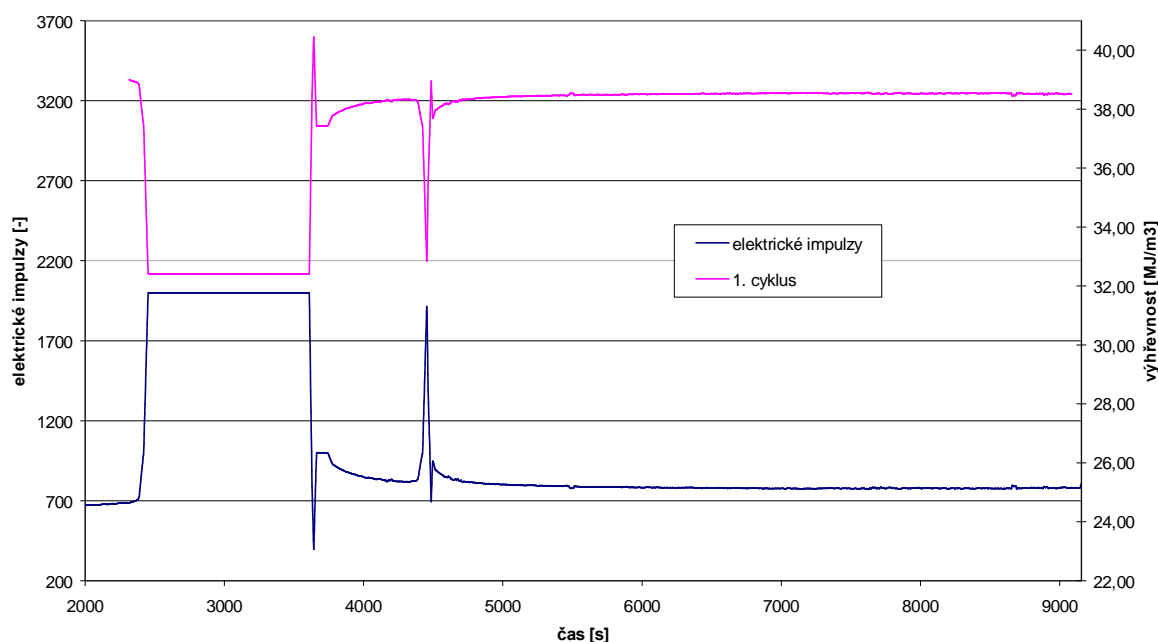
4.8 Rozsah měření

Na základě provedených měření si lze udělat obrázek o citlivosti měření, avšak stále neznáme přesnost měření a zejména měřicí rozsah. Přesnost měření budeme schopni snadno ověřit až ve chvíli, kdy budeme znát skutečnou hodnotu výhřevnosti kalibračního plynu.

Na základě naměřených výsledků dne 5.9. 2006 se dá usuzovat na poměrně omezený měřicí rozsah zařízení. Na grafu č. 5 je zachycena situace znázorňující zhasnutí plamene. Tento stav nastal po neotevření tlakové nádoby s kalibračním plynem. Při zhasnutí plamene dosáhly elektrické impulsy svého maxima – 2000 impulsů/jednotku času. Tomuto zvýšení ovšem dle grafu odpovídá snížení výhřevnosti pouze o cca 6 MJ/m³. Ve skutečnosti se však jedná o pokles výhřevnosti o více než 33

MJ/m^3 (na 0 MJ/m^3). Měřidlo v současném zapojení dokáže měřit topné plyny (nehledě na nastavenou hodnotu) s výhřevností v rozmezí od 28 MJ/m^3 do 36 MJ/m^3 . Z hlediska kontrolního měření pouze ruského zemního plynu je tento rozsah dostačující, nicméně pokud by byl zájem na měření i jiných energetických plynů, je tento měřicí rozsah velice úzký a nezahrnuje ani celou kategorii „Velmi výhřevných plynů“ $20 - 50 \text{ MJ/m}^3$ dle ČSN 335502. Nejmenší měřicí rozsah vyhovující předpokládanému záměru využití měřidla se pohybuje dle našeho názoru v rozsahu minimálně $20 - 45 \text{ MJ/m}^3$.

5.9.2006 1. cyklus



Graf č.: 5 Změna udávané výhřevnosti plynu při zhasnutí plamene

4.9 Kalibrace

Způsob kalibrace se po prvním zkušebním měření jeví jako nevyhovující. Pozorování se po desetiminutovém kalibračním měření vezme poslední hodnota, kterou systém zaznamená a tím je dána kalibrační konstanta pro celý měřicí cyklus! Na grafech v příloze č. 2 (kalibrační konstanta je znázorněna vodorovnou čarou na konci grafu) je zřejmé, že ne vždy je tato hodnota směrodatná a může díky tomuto postupu docházet k nemalým chybám. Pro lepší orientaci v grafech byla k naměřeným datům vypočtena průměrná hodnota z ustálené části kalibrace. V případě, kdy nebyla měřena a porovnávána absolutní hodnota výhřevnosti, není tento nedostatek nijak zásadní, ale pro další měření je takový postup nepřipustný! Je třeba změnit na odpovídající průměrnou hodnotu z naměřených dat příslušejících pouze kalibračnímu plynu.

5 NEJISTOTY MĚŘENÍ S PROTOTYPEM HCO_051

Při vyhodnocování nejistot a pokusu o analýzu je třeba postupovat v souladu s obecnou metodikou a zásadami, jak byly popsány v předchozím textu této práce.

5.1 Jmenovitá hodnota Q_j

Jmenovitou hodnotu výhřevnosti Q_j dostaneme sumarizací všech průměrných hodnot měření z *tabulky 1* a podělením počtem měření.

$$Q_j = \frac{\sum Q}{n}$$

$$Q_j = \frac{506,9929}{13}$$

$$Q_j = 38,9994 \text{ MJ/m}^3$$

5.2 Vyhodnocení standardní nejistoty měření typu A

Standardní nejistotu typu A získáme ze statistické analýzy směrodatných odchylek od naměřených průměrných hodnot výhřevnosti *tabulky 1*. Získanou hodnotu podělíme odmocninou počtu měření.

$$u_A = \frac{\sum \sigma(X)}{\sqrt{n}}$$

$$u_A = \frac{0,3189}{\sqrt{13}}$$

$$u_A = 0,0884 \text{ MJ/m}^3$$

5.3 Vyhodnocení standardní nejistoty měření typu B

5.3.1 Vyhodnocení standardní nejistoty měření typu B prototypu HCO_051

Nejistotu měření dostaneme výpočtem pomocí maximální směrodatné odchylky, naměřené na chromatografu GC Daniel, od hodnot naměřené na prototypu HCO_051.

$$u_{B1} = \frac{\Delta Z_{\text{max}}}{\sqrt{3}}$$

$$u_{B1} = \frac{0,0054}{\sqrt{3}}$$

$$u_{B1} = 0,0031 \text{ MJ/m}^3$$

5.3.2 Vyhodnocení standardní nejistoty měření typu B chromatografu GC Daniel 500

Standardní nejistotu měření typu B na chromatografu GC Daniel 500 se mi podařilo získat přímo z materiálů od výrobce a v našem případě činní

$$u_{B2} = 0,08 \text{ MJ/m}^3$$

5.3.3 Vyhodnocení ostatních standardní nejistoty měření typu B

Největším dalším vlivem, který by mohl ovlivnit nejistotu měření, je teplota, která byla již zahrnuta opakovaným měřením a vyhodnocením rozsáhlých souborů dat při běžném kolísání teploty do nejistoty typu A. Ostatní vlivy jsou natolik malé, že je můžeme zanedbat. Lze o nich prakticky s jistotou říci, že splňují podmínku poměru 1:5 a vyššího, čímž se v součtu čtverců prakticky neprojeví

5.3.4 Celková standardní nejistota typu B

Celkovou standardní nejistotu typu B získáme součtem jednotlivých nejistot stejného typu.

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2}$$

$$u_B = \sqrt{0,0031^2 + 0,08^2}$$

$$u_B = 0,08 \text{ MJ/m}^3$$

5.4 Vyhodnocení kombinované standardní nejistoty

Kombinovanou standardní nejistotu dostaneme odmocněním součtu kvadrátů nejistoty typu A a nejistoty typu B.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

$$u_C = \sqrt{0,0883^2 + 0,08^2}$$

$$u_C = 0,1191 \text{ MJ/m}^3$$

$$Q = 38,9994 \text{ MJ/m}^3 \pm 0,1191 \text{ MJ/m}^3$$

5.5 Rozšířená nejistota

Při standardní nejistotě u_C je cca 67% spolehlivost vypočtené nejistoty. Pro zvýšení spolehlivosti zvyšujeme danou hodnotu o koeficient k_R . Pro tento případ jsem zvolil $k_R = 2$, čímž se spolehlivost nejistoty přiblíží na cca 95 %.

$$U_{(Q)} = u_C \cdot k_R$$

$$U_{(Q)} = 0,1191 \cdot 2$$

$$U_{(Q)} = 0,2383 \text{ MJ/m}^3$$

Relativní rozšířená nejistota $U_{(Q)} \doteq 0,62 \%$

$$Q = (38,9994 \text{ MJ/m}^3 \pm 0,62) \text{ MJ/m}^3$$

6 ZÁVĚR

Na základě měření prvních a již poměrně rozsáhlých sérií zkušebních měření na prototypu lze říci, že manipulace s měřidlem, jeho připojení, zapínání i vypínání, je velice jednoduchá a samotné měření je bezobslužné. Po celou dobu zkušebních měření nedošlo k samovolnému zhasnutí plamene, i když měřidlo není opatřeno hlídáním plamene. To nasvědčuje velké stabilitě měření.

Z důvodu orientačně nastavené hodnoty výhřevnosti kalibračního plynu, nebylo možné hodnotit absolutní měřenou výhřevnost a porovnávat ji s výstupy z obchodního měření GC DANIEL. V naměřených výsledcích lze však pozorovat, že průměrná odchylka měření je v porovnání s CG DANIEL sice o jeden řád větší, ale i tak je její hodnota (obvykle $< 0,018 \%$) velice příznivá.

Pro další zlepšení vlastností měřidla bylo navrženo několik zlepšení, které vycházejí z našich zkušebních měření a krátkých zkušeností s měřidlem. Tyto připomínky nejsou v žádném případě dogmatické a jsme připraveni diskutovat nad lepšími řešeními či vyvrácením našich mylných závěrů. Po provedení optimalizace měřidla bude nutné provést opětovné zkušební měření (v podstatně větším rozsahu) a porovnat dosažené výsledky.

Bohužel největšími překážkami v plánovaném průmyslovém využití tohoto přístroje nadále shledáváme výstupní hodnotu v podobě výhřevnosti, (nikoli všeobecně obchodované spalné teplo) včetně problematického přepočtu na různé referenční podmínky spalování a nemožnost použití přístroje ve výbušném prostředí.

Zcela závěrem provedené analýzy nejistot, které je nezbytnou složkou v případě zavedení tohoto měřidla do předávacích řízení na plynovodech při vstupu a výstupu na území ČR respektive, mezi jednotlivými distributory aj., v rámci případného schvalování typu měřidla v metrologickém řízení, je třeba říci, že předložená práce uvádí jen první a jeden názor na celou složitou problematiku. Pro detailní posouzení bude zapotřebí provedení dalších a nezávislých analýz. V tomto momentě třeba sebekriticky dodat, že jako jeden ze zaměstnanců se rozhodně nemohu považovat za dokonale nestranného. Přesto i tato má snaha a výsledky předložené bakalářské práce prokazují životaschopnost a použitelnost vyvinuté metodiky a přístroje, alespoň z hlediska zjednodušené analýzy nejistot.

7 TIPY A DOPORUČENÍ

7.1 Měřicí cyklus

Doporučovali bych vyzkoušet i jiné režimy měření vs. kalibrace. V současnosti je systém nastaven na 120 minutový cyklus, kde nejprve 10 min probíhá kalibrace a poté 110 minut vlastní měření. Pro začátek, abychom získali co možná nejvěrohodnější vzorek dat o stabilitě měření, bychom doporučili interval prodloužit např. až na 300 minut, nebo ještě více. První kalibraci však provést až po 2 hodinách od zapálení plamínku, jinak měření prakticky nemá smysl. Následně bychom provedli porovnání mezi naměřenými hodnotami s různou délkou cyklu, zda se hodnoty shodují nebo se významně rozcházejí. Na základě tohoto porovnání bychom teprve navrhli optimalizaci délky cyklu. Pokud by to nebylo příliš složité a nákladné bylo by v této souvislosti také vhodné vytvořit možnost manuálního zapnutí kalibrace kdykoliv v průběhu měření [2].

7.2 Přepínání mezi plyny

Čas na propláchnutí trubiček a ustálení systému po přepnutí mezi kalibračním a měřeným plynem resp. i opačně je závislý na rozdílu výhřevností použitého kalibračního a měřeného plynu. Čím více se výhřevnost kalibračního plynu liší od měřeného plynu je potřebná delší doba na opětovné ustálení systému. Přednastavená 1 minuta je naprosto nedostačující (postačuje pouze ve chvíli, kdy je kalibrační plyn totožný s měřeným plynem). V našem případě (kalibrační plyn CH_4 – (možná s obsahem malého množství N_2) a měřený plyn - ZP ruský s obsahem CH_4 větším než 97,9%) je potřeba nastavit intermezzo alespoň na 5 minut. Vzniklé "ocásky" křivek na začátcích kalibrace resp. měření nejen že mohou velmi ovlivňovat naměřené hodnoty, ale co je ještě horší, mohou způsobit chybu celé kalibrace. Chybu v kalibraci tento jev nezpůsobí, pokud se kalibruje způsobem jako dosud.

7.3 „Referenční“ teplota spalování

Teplota plynů přiváděných ke spalování je v měřidle HOC nastavena na 40°C. Hodnota výhřevnosti při této teplotě je reprodukována jako výhřevnost při referenční teplotě spalování 15°C. Tento rozpor se může stát zdrojem chyb měření zejména v případech, kdy se složení měřeného plynu bude podstatně lišit od složení plynu kalibračního. Tento nedostatek by bylo možné eliminovat prakticky jenom přidáním termostatované jednotky, která by uměla temperovat teploty plynů na zadané referenční podmínky spalování (např. 15°C, 20°C či 25°C). Vzhledem k náročnosti této operace, bylo by vhodné počkat s takovouto úpravou na výsledky dalších měření.

7.3 Interval výstupu

Reprodukování údajů o výhřevnosti každé 2 sekundy je více než zbytečné. Za prvé je těchto dat strašně mnoho na následné zpracování (MS Excel disponuje cca 68 000 řádky); z měření trvajících 24 hodin je kolem 42 000 údajů, reprezentujících každý jeden řádek v Excelu. Tudiž je zřejmé, že bez dalších úprav není možné tímto programem zpracovávat najednou data z měření trvajících déle než asi 1,5 dne. Bohatě by stačily údaje statisticky zpracované 1x 30 sekund. Pro porovnání s naším obchodním měřením GC DANIEL, byl by nejvhodnější interval 5 min.

Doporučuji opět nastavení SW možnosti volby intervalu výstupu od měřených 2 s až po cca 10-15 min. se zabudováním optimálního statistického výpočtu střední hodnoty.

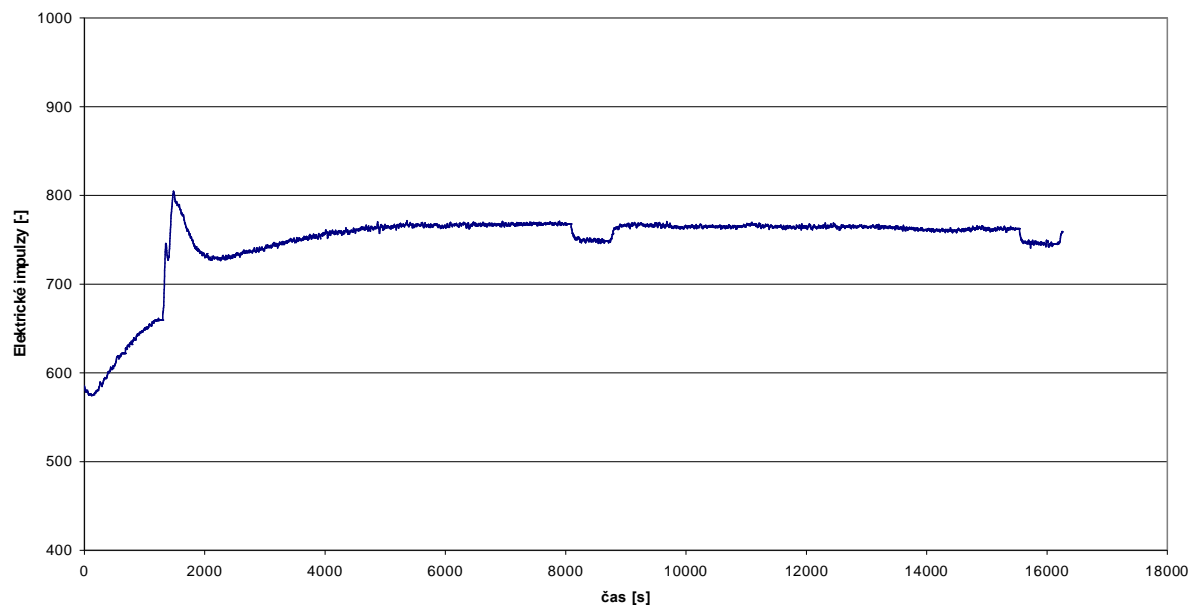
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VDOLEČEK, F.:Nejistoty měření a současná legislativa, Automa , Vol.11, (2005), No.7, pp.52-54, ISSN 1210-9592
článek v časopise
- [2] LIPENSKÝ,J – Vnitropodnikové zprávy z měření RWE Transgas Net s.r.o
- [3] SEDLÁČEK, Miloš. Teorie nejistoty měření. *Prezentace ze symposia 2006* [cit. 2006-11-24]
- [4] CHUDÝ, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických veličín : 1.vydání Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.
- [5] JENČÍK, J; Volf, J.; Technická měření : 1.vydání Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.

PŘÍLOHY

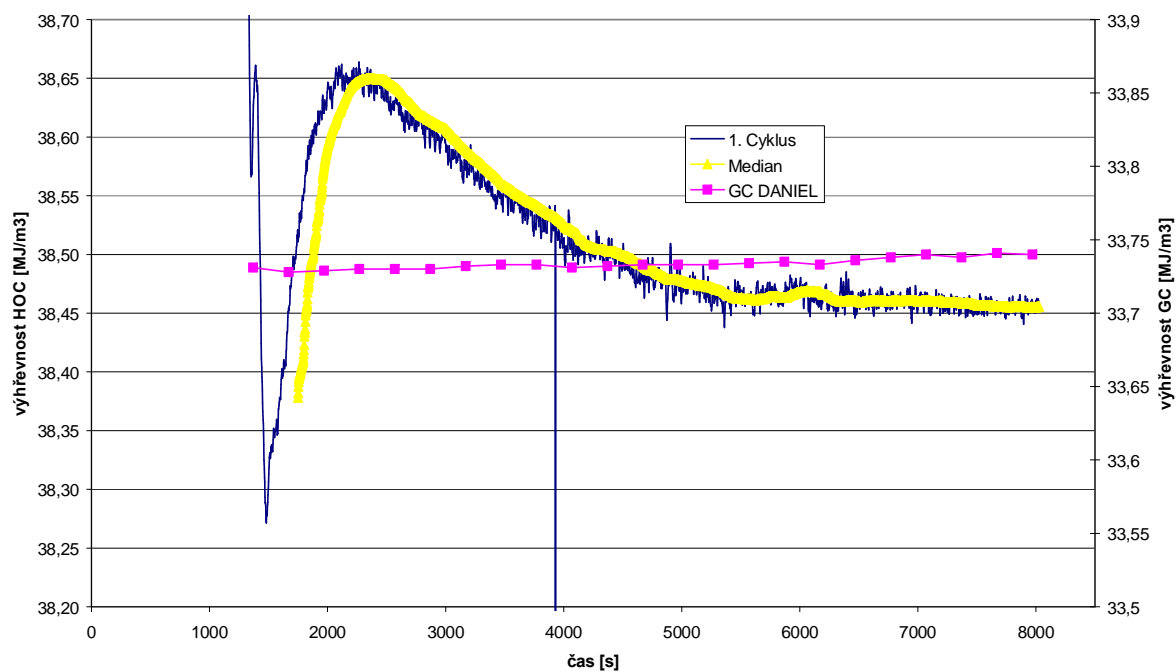
Příloha č.:1

24.8.2006 celé měření

*Průběh celého měření dne 24.8.2006*

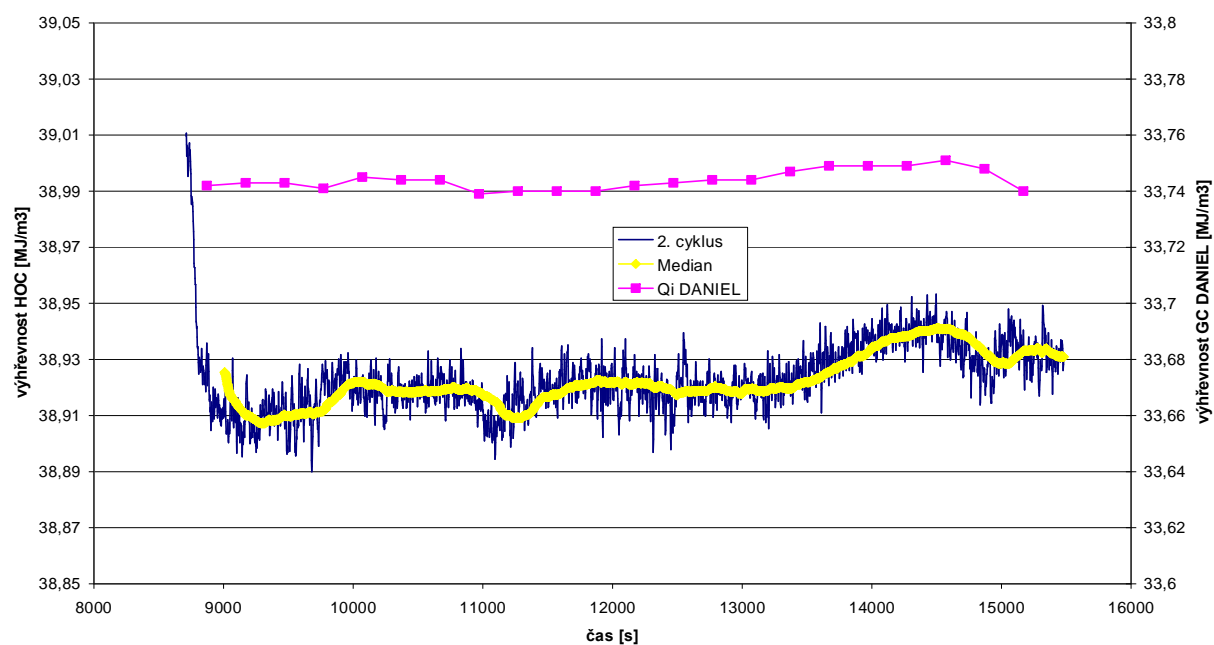
Příloha č.:2

24.8. 2006 - 1. Cyklus

*Průběh prvního (ještě neustáleného) cyklu měření dne 24.8.2006*

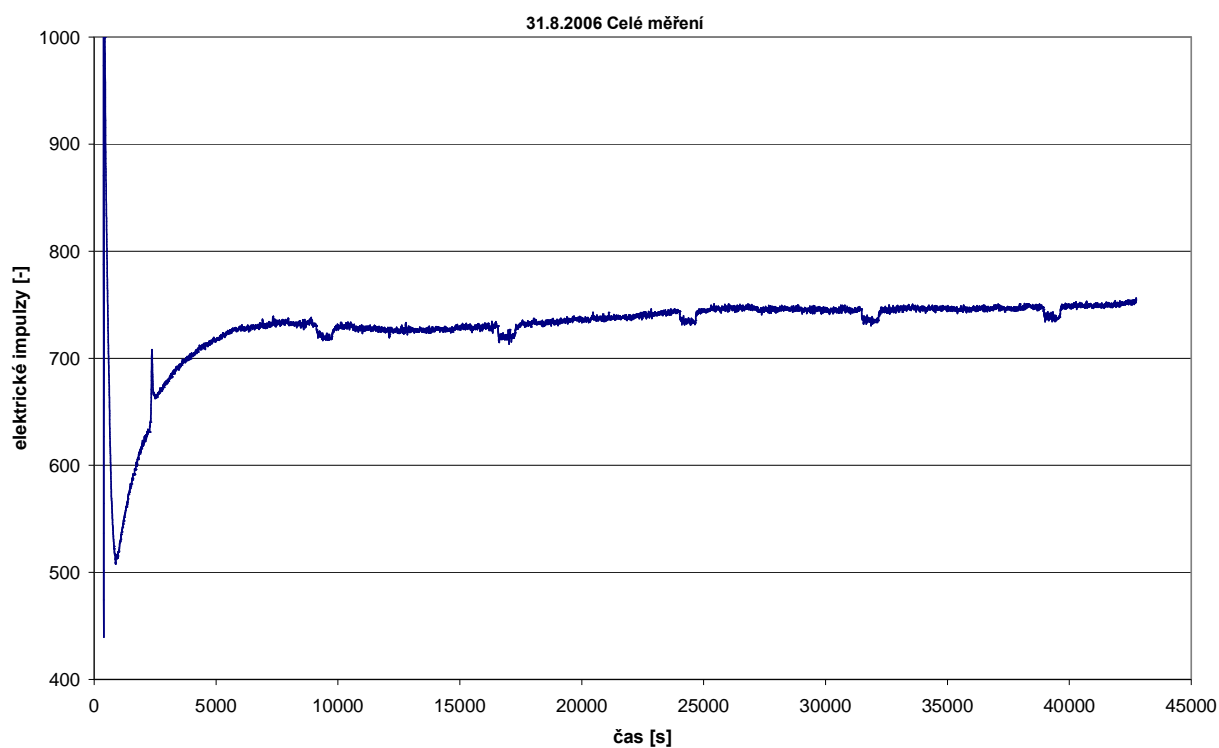
Příloha č.:3

24. 8. 2006 2. cyklus



Průběh druhého cyklu měření dne 24.8.2006

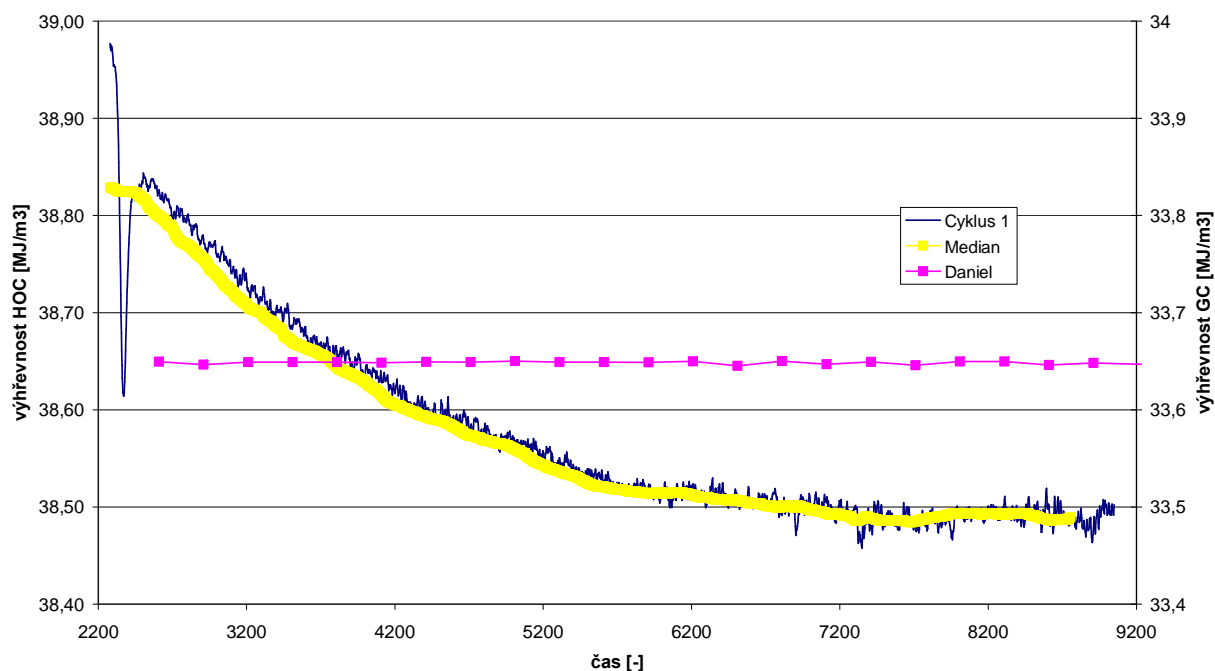
Příloha č.:4



Průběh celého měření dne 31.8.2006

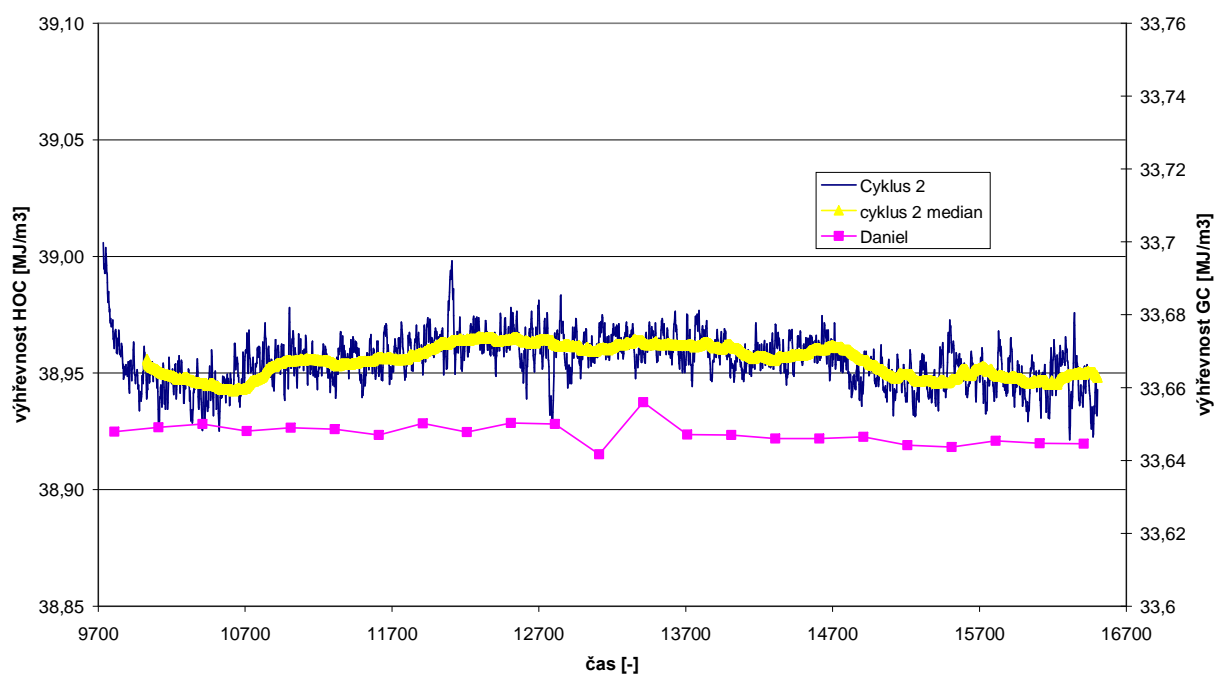
Příloha č.:5

31.8. 2006 1. cyklus

*Průběh prvního (neustáleného) cyklu měření dne 31.8.2006*

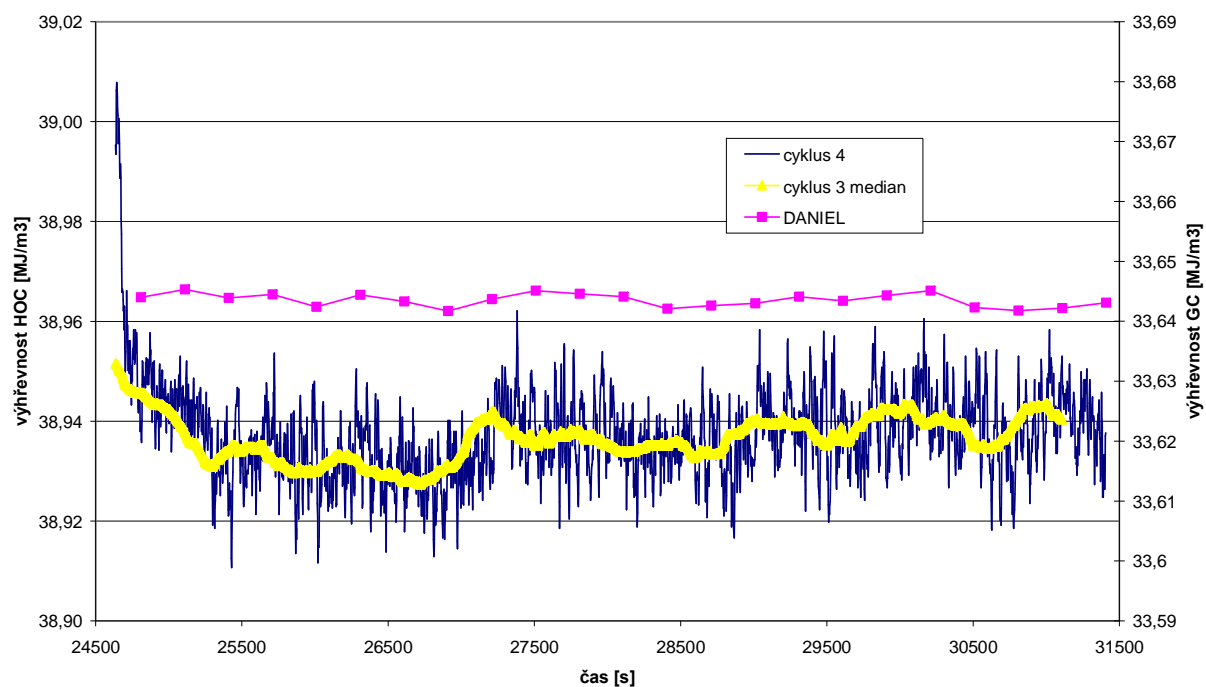
Příloha č.:6

31.8. 2006 2. cyklus

*Průběh druhého cyklu měření dne 31.8.2006*

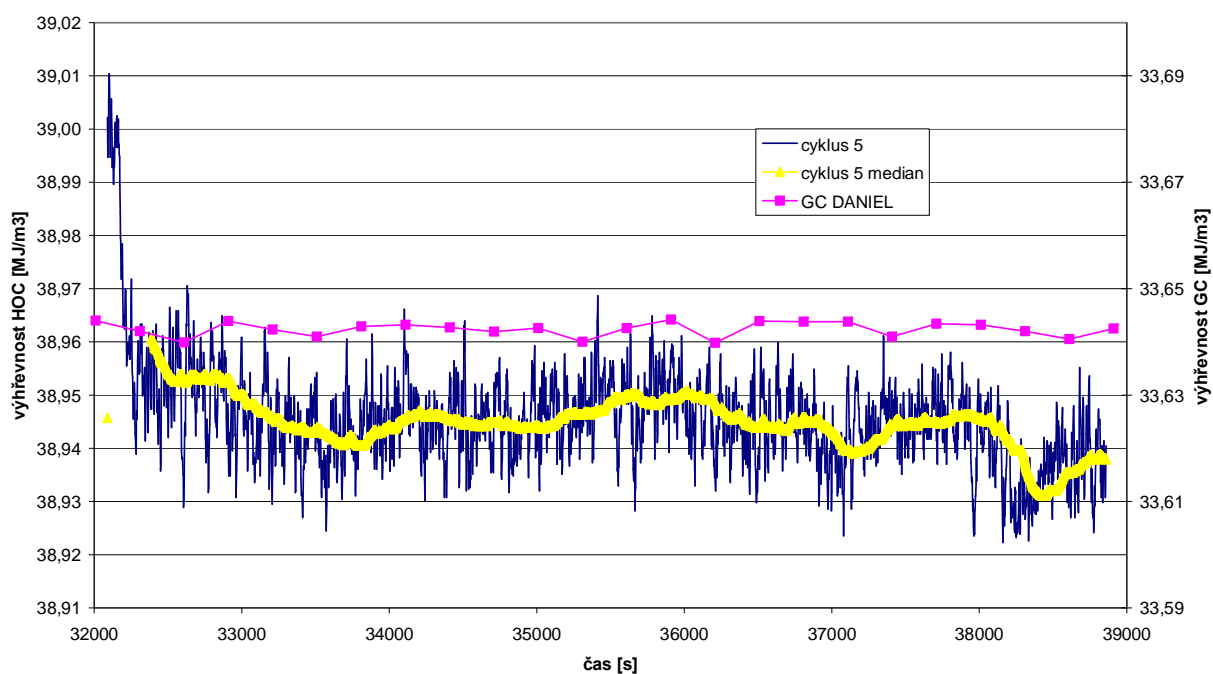
Příloha č.:7

31.8. 2006 4. cyklus

*Průběh čtvrtého cyklu měření dne 31.8.2006*

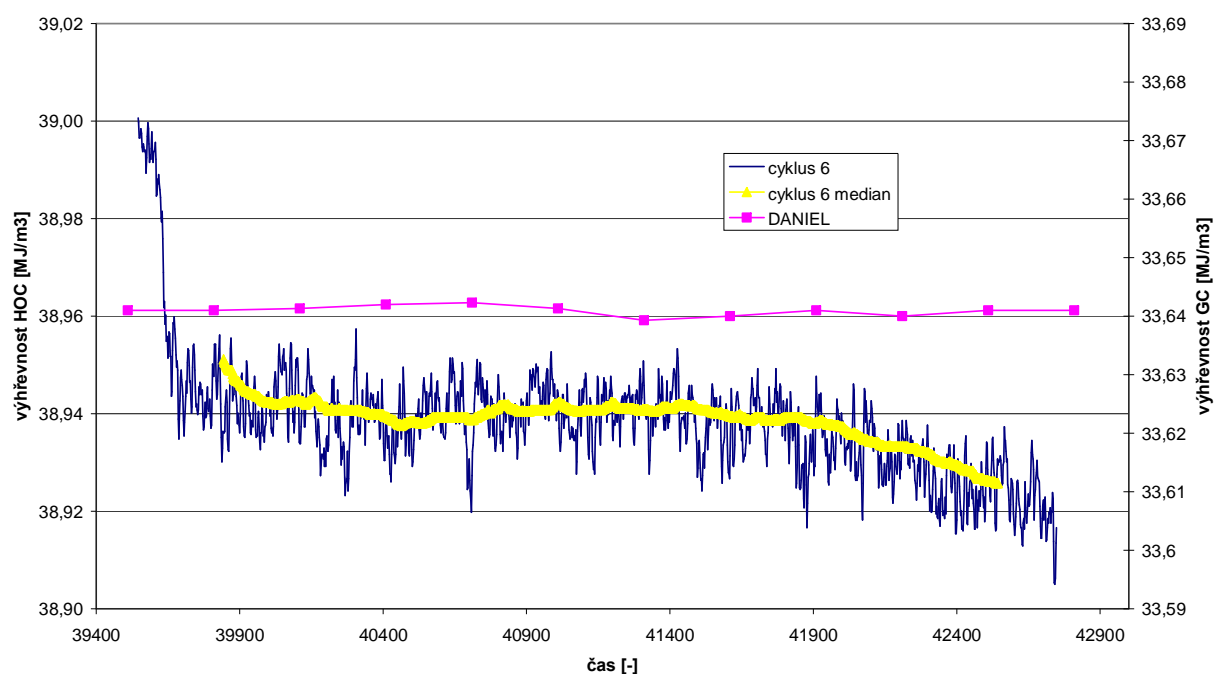
Příloha č.:8

31.8. 2006 5. cyklus

*Průběh pátého cyklu měření dne 31.8.2006*

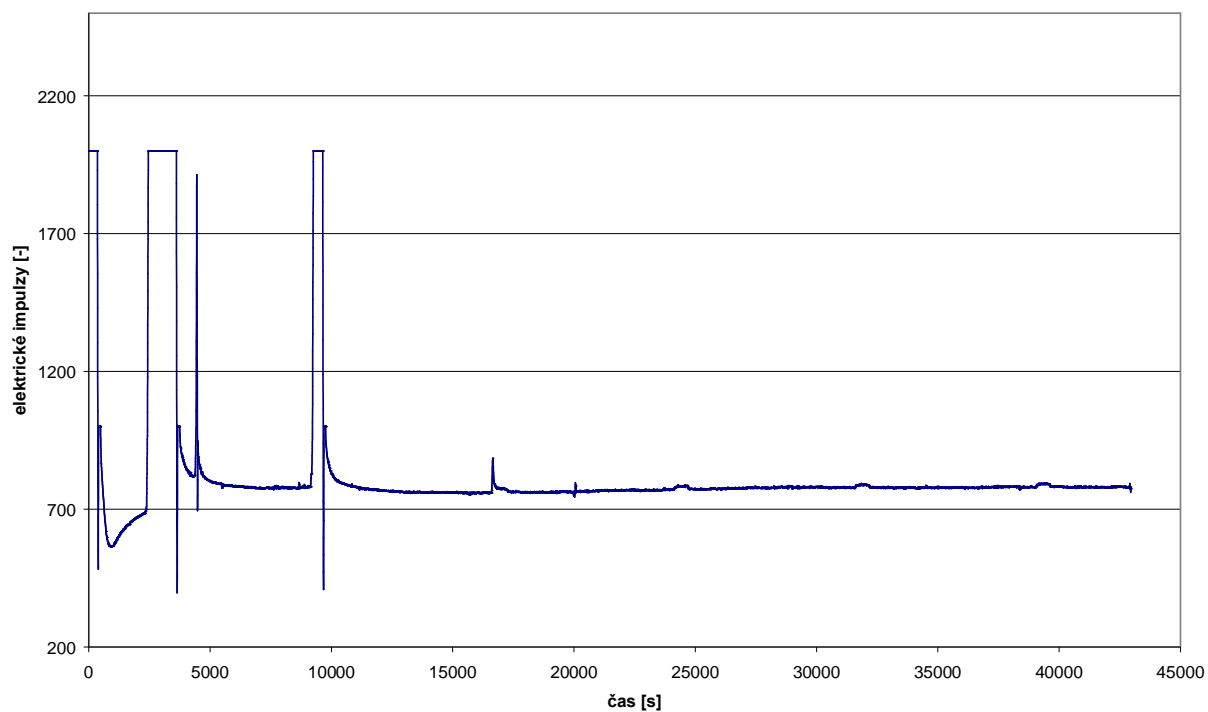
Příloha č.:9

31.8.2006 6. cyklus

**Průběh šestého cyklu měření dne 31.8.2006**

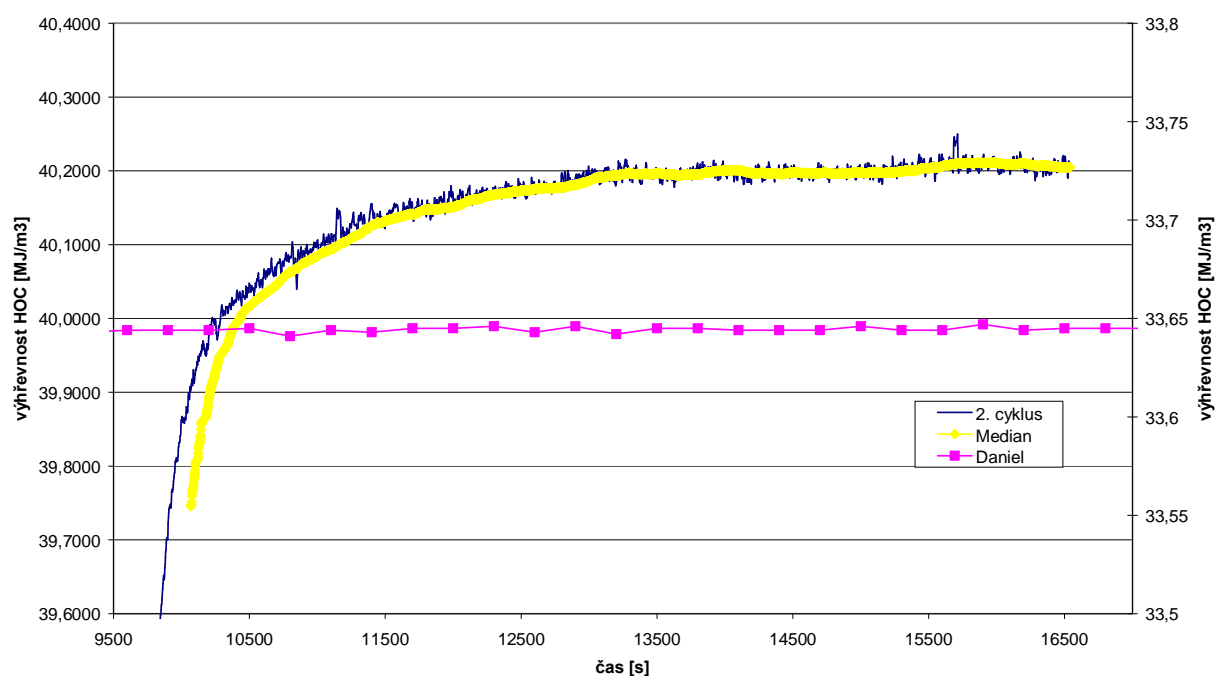
Příloha č.:10

5.9. 2006 celé měření

**Průběh celého měření dne 5.9.2006**

Příloha č.:11

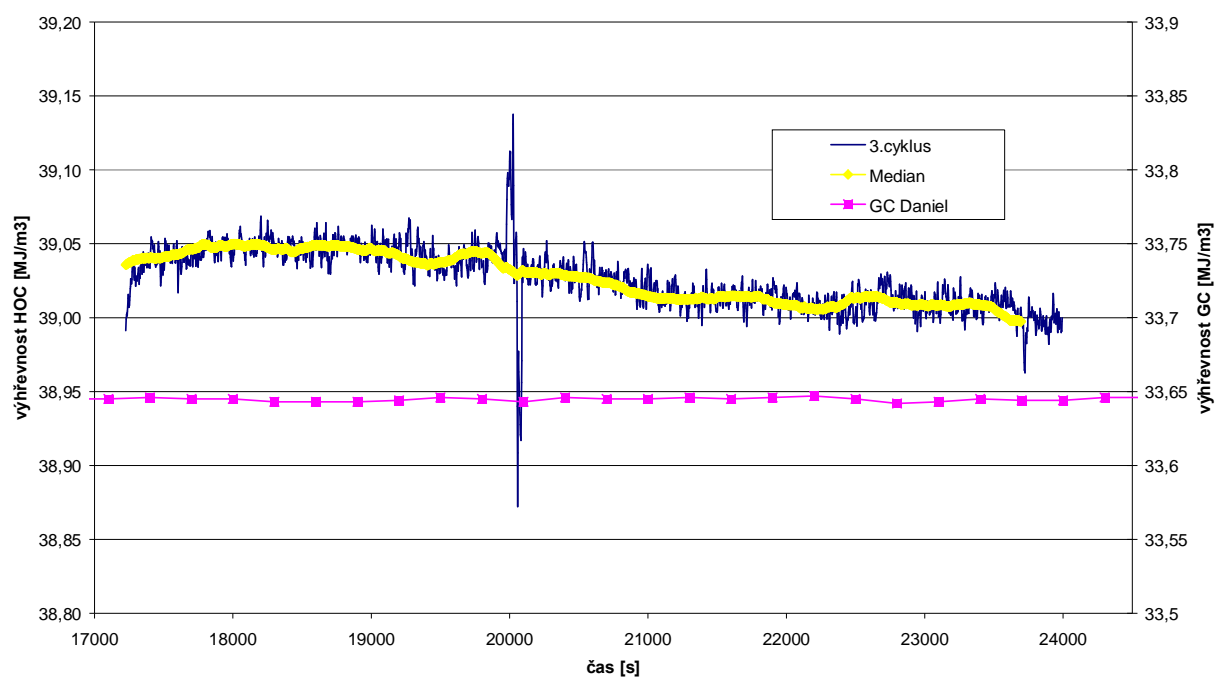
5.9. 2005 2.cyklus



Průběh druhého (neustáleného) cyklu měření dne 31.8.2006

Příloha č.:12

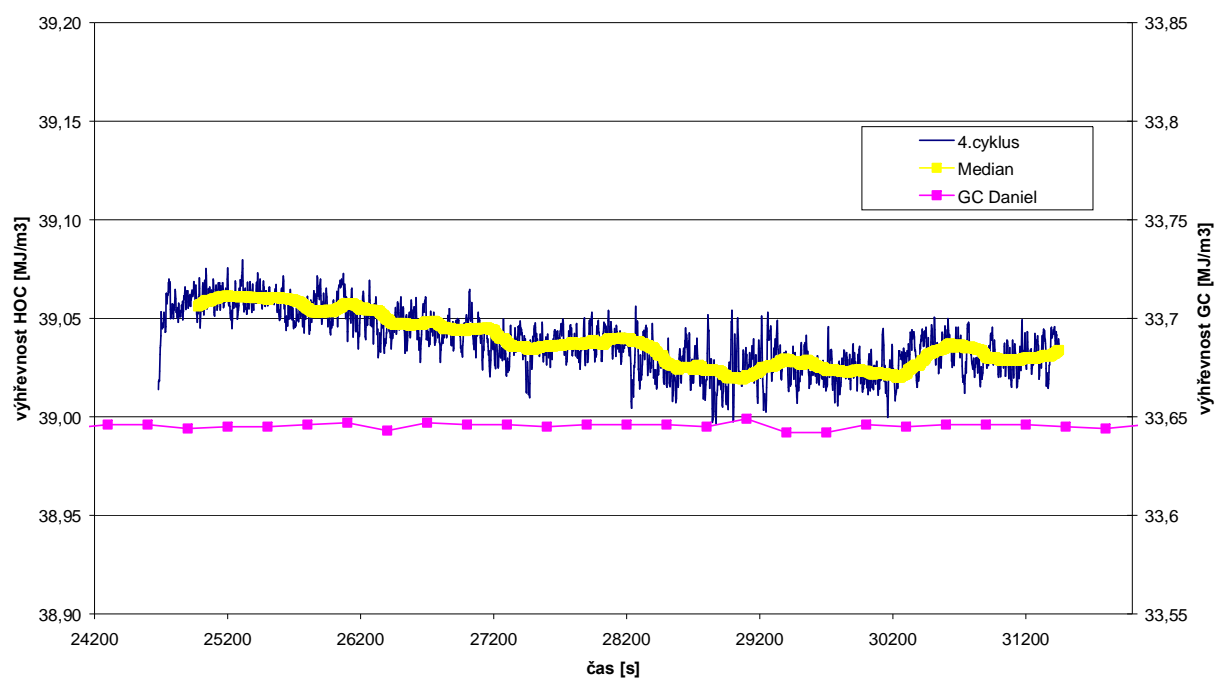
5.9.2006 3. cyklus



Průběh třetího cyklu měření dne 31.8.2006

Příloha č.:13

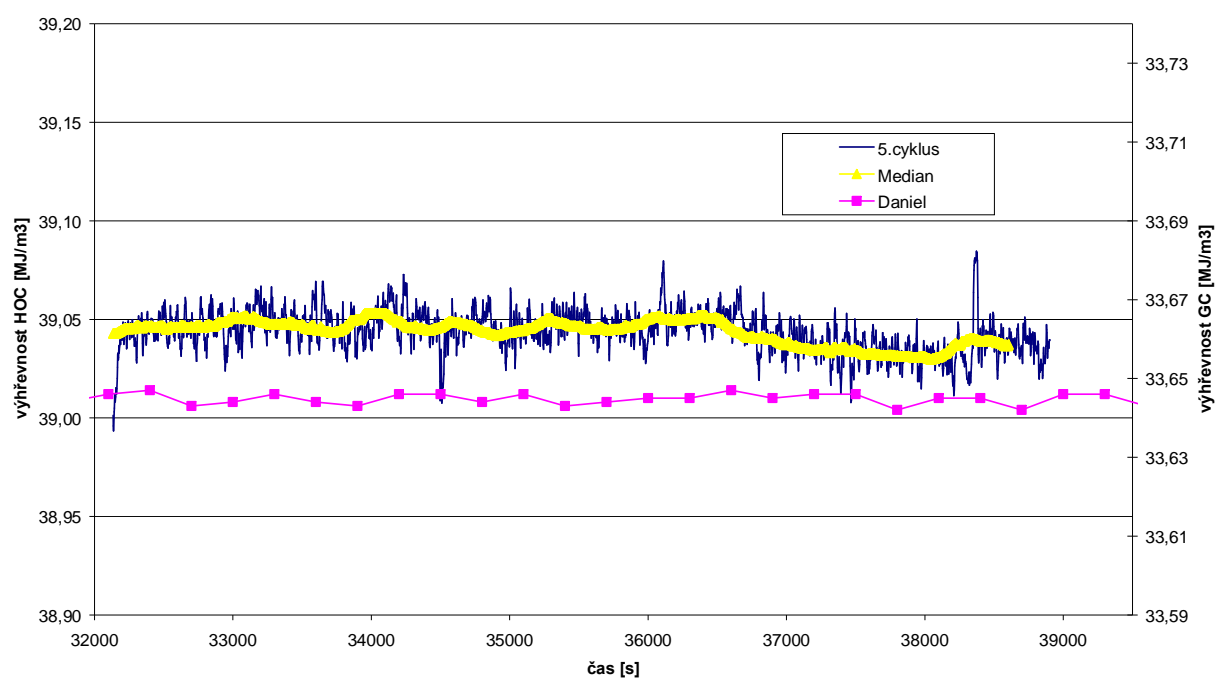
5.9.2006 4. Cyklus



Průběh čtvrtého cyklu měření dne 31.8.2006

Příloha č.:14

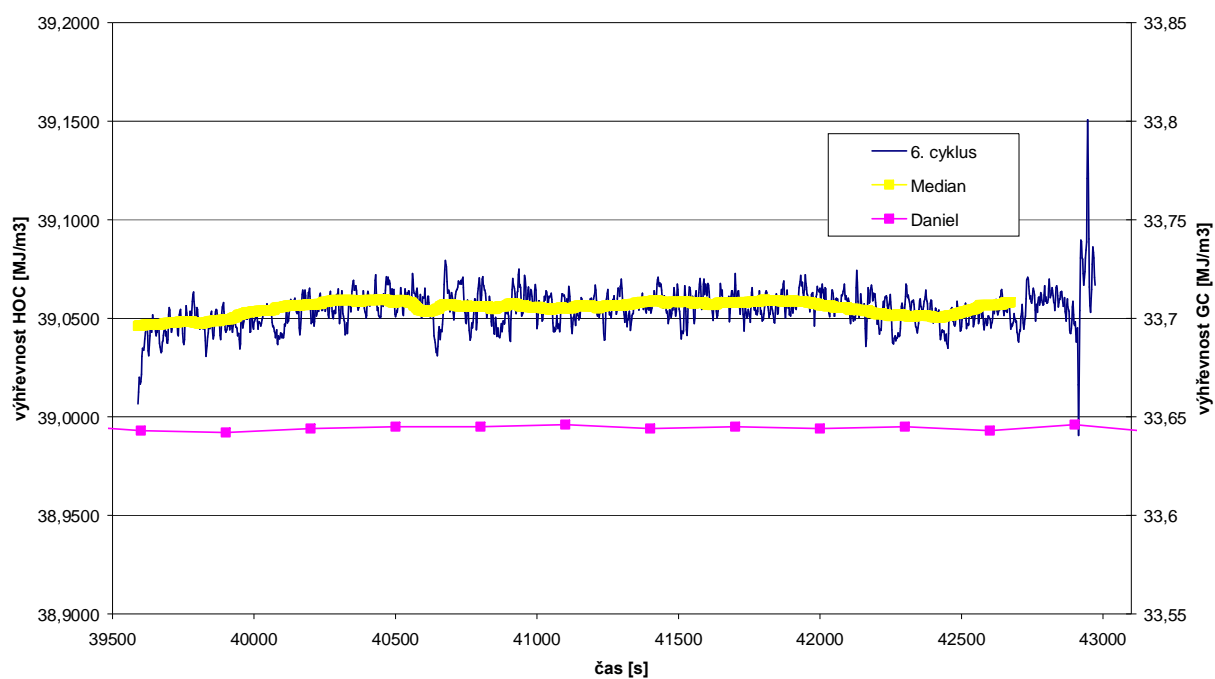
5.9.2006 5. cyklus



Průběh pátého cyklu měření dne 31.8.2006

Příloha č.:15

5.9.2006 6. cyklus

*Průběh šestého cyklu měření dne 31.8.2006*